

КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

ШИЛОВА ЕЛЕНА ВЛАДИМИРОВНА

**ОРБИТАЛЬНЫЙ ПОРЯДОК И СПИНОВАЯ КИНЕТИКА
СЛАБОДОПИРОВАННЫХ МАНГАНИТОВ**

01.04.02 Теоретическая физика.

Автореферат

диссертации на соискание ученой
степени кандидата физико-математических наук

КАЗАНЬ 2004

Работа выполнена на кафедре теоретической физики
Казанского государственного университета

Научный руководитель: - доктор физико-математических наук,
профессор Кочелаев Б.И.

Официальные оппоненты: - доктор физико-математических наук,
профессор Рудой Ю.Г.
- доктор физико-математических наук,
профессор Хусаинов М.Г.

Ведущая организация: Московский государственный
университет им. М.В. Ломоносова.

Защита состоится декабря 2004 г в на заседании
диссертационного совета Д.212.081.15 при Казанском
государственном университете им В.И. Ульянова-Ленина по
адресу: г. Казань, ул. Кремлевская, 18.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке им.
Н.И. Лобачевского Казанского государственного университета.

Автореферат разослан « » ноября 2004 г.

Ученый секретарь
специализированного совета,
д.ф.-м.н., профессор

Еремин М.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Со времени синтеза манганитов Джонкером и Сантенем в 1950 г. [1] интерес к исследованию манганитов постоянно нарастает. На основе оксида марганца синтезируются все новые соединения, их можно охарактеризовать одной формулой $R_{1-x}A_xMnO_3$ ($R=La, Pr, Nd, Sm$; $A=Ca, Sr, Ba, Pb$ и др.). При изменении концентрации x двухвалентного элемента A в диапазоне $0 < x < 1$ система проходит ряд разного рода фазовых переходов. В области $0 < x < 0.5$ манганитам присуще уникальное свойство – колоссальное отрицательное магнетосопротивление, когда слабое изменение приложенного к образцу внешнего магнитного поля уменьшает удельное сопротивление образца в несколько десятков раз [2-5]. В последнее время легированные двухвалентными элементами окислы переходных металлов $R_{1-x}A_xMnO_3$ являются объектом многочисленных экспериментальных и теоретических исследований [2-5 и др.]. Теоретические исследования манганитов направлены на выявление микроскопических механизмов, ответственных за разнообразие свойств присущих этим соединениям. Так как расстояние между магнитными ионами Mn велико, сразу стало ясно, что прямого обменного взаимодействия не достаточно для обеспечения магнитного порядка, наблюдающегося в манганитах. На основе модели суперобменного взаимодействия [6-8] были разработаны более сложные механизмы описания магнитного порядка [9]. Эксперименты по магнитному рассеянию нейтронов показали наличие анизотропии магнитных подрешеток [10]. Неколлинеарность магнитных подрешеток может

быть обусловлена анизотропией одиночного иона в кристаллическом поле решетки и спин-орбитальным взаимодействием. В манганитах анизотропия усиливается кооперативным эффектом Яна-Теллера, снимающим вырождение основного состояния, приводя к искажению октаэдров MnO_6 . Между спиновым и орбитальным порядком и между орбитальным порядком и решеточными искажениями существуют сильные корреляции. Исследование частично заполненной d -оболочки ионов Mn^{3+} методом электронного парамагнитного резонанса (ЭПР), анизотропии и температурной зависимости \mathbf{g} -тензора и ширины линии ЭПР дает ясную информацию об орбитальном порядке через спин-орбитальное взаимодействие. Существовавшая на начало наших исследований теория не могла описать поведение манганитов во всей исследуемой области орбитального упорядочения и нуждалась в существенной доработке.

Целью настоящей работы является самосогласованный анализ причин аномального немонотонного поведения сигнала ЭПР в области орбитального упорядочения для слабодопированных манганитов.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разработана модель для описания орбитального упорядочения при структурном фазовом переходе вследствие кооперативного эффекта Яна-Теллера для слабодопированных манганитов с учетом как искажений октаэдров MnO_6 , так и их локальных вращений.

2. Вычислена зависимость параметров сигнала ЭПР от температуры и ориентации внешнего магнитного поля относительно кристаллографических осей. Показано, что в условиях сильных обменных взаимодействий между ионами Mn^{3+} , решающую роль в необычной немонотонной температурной зависимости ширины линии ЭПР играет неразрешенная тонкая структура спиновых уровней энергии, обусловленная Ян-Теллеровскими искажениями кристаллической решетки.
3. Установлено, что взаимодействие Мории-Дзялошинского не дает критического вклада в уширение линии ЭПР при магнитном фазовом переходе в антиферромагнитное (АФМ) состояние и дает сравнительно слабую зависимость от ориентации внешнего магнитного поля.
4. Определены поправки к эффективному \mathbf{g} – тензору через параметры спинового гамильтониана в условиях неразрешенной тонкой структуры и орбитального упорядочения.

Научная новизна работы заключается в том, что разработан единый подход к анализу особенностей спектра ЭПР в системе $La_{1-x}Sr_xMnO_3$ в широком температурном интервале от магнитного (при $T_N = 140$ K) до структурного фазового перехода (при 600K). В рамках разработанной модели получена температурная зависимость скорости поперечной спиновой релаксации, обусловленной искажениями идеальной перовскитной структуры вследствие кооперативного эффекта Яна-Теллера в области орбитального упорядочения. Получено общее выражение для гамильтониана

анизотропного взаимодействия Мории–Дзялошинского для исследуемой системы в условиях орбитального упорядочения. На основе предложенного гамильтониана проведен расчет вклада в ширину линии ЭПР, обусловленного взаимодействием Мории–Дзялошинского, в зависимости от температуры и угла приложения внешнего магнитного поля в окрестностях структурного и магнитного фазовых переходов.

Практическая ценность работы:

Полученные результаты позволят извлекать методом ЭПР конкретную информацию об орбитальном упорядочении и магнитном фазовом переходе в манганитах.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на следующих научных конференциях: (1-2) международных школах-семинарах физиков теоретиков “Коуровка-2002” (Кунгур, 2002 г.), “Коуровка-2004” (Екатеринбург-Челябинск, 2004 г.); (3) международной конференции “Современные проблемы сверхпроводимости” (Ялта 2002 г.); (4) 7-ой российской молодежной научной школе “Новые аспекты применения магнитного резонанса” (Казань 2003 г.); (5) итоговой научной конференции Казанского государственного университета в 2003 г.; (6) 9-ой научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов научно-образовательного центра Казанского государственного университета “Материалы и технологии XXI века” (2004 г.); (7) международной конференции “Наноразмерные свойства конденсированного состояния, исследованные резонансными явлениями” (Казань 2004 г.).

Личный вклад автора. Представленные в работе выражения для ширины линии ЭПР и компонент \mathbf{g} –тензора в манганите $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ в области от структурного до магнитного фазового перехода получены лично автором. Методом подгонки с использованием стандартного пакета Origin автор сравнил ход экспериментальных и полученных теоретических зависимостей и определил структурный и магнитный критические индексы.

Публикации. Основное содержание работы отражено в 2 статьях и 6 тезисах.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и приложения. Она изложена на 111 страницах, включая одну таблицу, 17 рисунков, список литературы из 107 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность проблемы, формулируются цель и задачи исследования.

Первая глава имеет обзорный характер. Здесь отражается развитие исследований манганитов. Приведены некоторые экспериментальные данные, отражающие характерные особенности LaMnO_3 . Кратко изложены фундаментальные представления о магнитном и орбитальном упорядочении. Приведены правила Гудинафа-Канамори [11] косвенной обменной связи между магнитными катионами разделенными немагнитными анионами. Модель двойного обмена Андерсона-Зинера [12]

проиллюстрирована на системе трех ионов [13]. Обобщение этого результата на решетку спинов было дано де Женом [14].

По данным нейтронографических исследований магнитные моменты подрешеток слабо неколлинеарны, что может быть обусловлено анизотропией одиночного иона в кристаллическом поле решетки, спин-орбитальным взаимодействием или анизотропным взаимодействием в спиновой системе. Спин-орбитальное взаимодействие приводит к зависимости обменных взаимодействий от углов между направлением намагниченности \mathbf{M} и осями кристаллической решетки, поскольку поворот спинов относительно решетки приводит к некоторому изменению электронных оболочек ионов. Т.о. энергия обменного взаимодействия, при наличии спин-орбитального взаимодействия, зависит от ориентации спинов относительно линий, соединяющих точки их расположения, т.е. относительно кристаллической решетки.

Отсюда следует, что в рассматриваемых соединениях орбитальный порядок играет очень важную роль. С другой стороны известно, что в манганитах лантана реализуется кооперативный эффект Яна-Теллера ($T < T_{JT} = 600\text{K}$), который приводит к вытягиванию октаэдров MnO_6 во взаимноперпендикулярных направлениях, снимая вырождение основного состояния. Этому явлению уделено особое внимание. Показана структура исследуемого соединения, отмечены её характерные искажения.

При приближении к температуре Нееля система испытывает переход в АФМ упорядоченное состояние. Это отражается на

спектре ЭПР его аномальной зависимостью от температуры. Для исследования этой области в данной работе используется приближение случайных фаз, которое также было приведено в первой главе.

В заключении первой главы рассмотрены основные соотношения сигнала ЭПР. Методом двухвременных функций Грина показано, что ширина линии ЭПР может быть выражена через второй момент и обменную частоту:

$$\Delta H = \frac{1}{g\mu_B\hbar\sqrt{\pi}} \cdot \frac{M_2(T)}{\omega_{ex}(T)}. \quad (1)$$

Во второй главе построен спиновый гамильтониан тонкой структуры спектра ЭПР с учетом орбитального упорядочения и локальных поворотов октаэдров MnO_6 в условиях сильных спин-спиновых корреляций. На его основе определена скорость поперечной спиновой релаксации в зависимости от температуры и угла приложения внешнего магнитного поля в области кооперативного эффекта Яна-Теллера. Определены поправки к эффективному \mathbf{g} – тензору через параметры спинового гамильтониана кристаллического поля и найдена их температурная зависимость.

Наша система может быть представлена гамильтонианом:

$$H = -\sum_{ij} J_{ij} (\mathbf{S}_i \mathbf{S}_j) + \mu_B \sum_i \mathbf{H} \mathbf{g} \mathbf{S}_i + H_{\text{int}}. \quad (2)$$

Первое слагаемое отвечает за изотропное суперобменное взаимодействие J_{ij} между соседними спинами \mathbf{S}_i и \mathbf{S}_j . Для LaMnO_3

оно сводится к ферромагнитному $J_{ij}=J_{ac}>0$ для ближайших соседей в ac плоскости и антиферромагнитному $J_{ij}=J_b<0$ для ближайших соседей вдоль оси b . Для упрощения нашей модели мы полагаем $J_{ij}=0$ для других соседей. Второй вклад - энергия Зеемана спинов во внешнем магнитном поле \mathbf{H} . Из-за эффекта Яна-Теллера \mathbf{g} – тензоры соседних ионов являются не эквивалентными и слабо анизотропными. В настоящей главе, при расчете ширины линии ЭПР этот факт не учитывается. Последнее слагаемое H_{int} содержит вклады не сохраняющие общий спин, такие как кристаллическое поле, взаимодействие Морие-Дзялошинского. Поскольку для обменной части гамильтониана полный спин является интегралом движения, то можно получить систему стационарных состояний, на которой наблюдается парамагнитное резонансное поглощение. Другие слагаемые спинового гамильтониана не коммутируют с ее обменной частью и, тем самым, служат источником уширения и расщепления резонансной линии поглощения и анизотропии \mathbf{g} – фактора.

Чтобы учесть отмеченное чередование орбиталей после структурного фазового перехода $O^* \rightarrow O'$ вызванного кооперативным эффектом Яна-Теллера мы построили эффективный спиновый гамильтониан тонкой структуры спектра ЭПР в основном состоянии Mn^{3+} на узле \mathbf{R}_j в следующей форме:

$$H_j^{CF} = \cos^2 \frac{\mathbf{R}_j \mathbf{Q}_{JT}}{2} \left\{ D (S_j^x)^2 + E \left[(S_j^y)^2 - (S_j^z)^2 \right] \right\} + \sin^2 \frac{\mathbf{R}_j \mathbf{Q}_{JT}}{2} \left\{ D (S_j^y)^2 + E \left[(S_j^x)^2 - (S_j^z)^2 \right] \right\}, \quad (3)$$

здесь $\mathbf{Q}_{JT}=(1;1;0)\pi/d$ – вектор Яна-Теллера, отражающий чередующиеся искажения соседних MnO_6 октаэдров в ac плоскости; d – параметр решетки неискаженной кубической перовскитной структуры. D и E – параметры спинового расщепления в нулевом магнитном поле: $D=D_0t^\beta$, $E=E_0t^\beta$. Их температурная зависимость вблизи кооперативного эффекта Яна-Теллера была представлена в виде $t=(T_{JT}-T)/T_{JT}$. Исходя из неискаженной перовскитной структуры, орторомбическая структура получается из трех последовательных малых поворотов октаэдра MnO_6 вокруг x - y - z осей на углы $\alpha_j, \beta_j, \gamma_j$ которые имеют следующую зависимость от узла j :

$$\alpha_j = \alpha \cos \mathbf{R}_j \mathbf{Q}_\alpha, \beta_j = \beta \cos \mathbf{R}_j \mathbf{Q}_\alpha, \gamma_j = \gamma \cos \mathbf{R}_j \mathbf{Q}_\gamma, \quad (4)$$

где $\mathbf{Q}_\alpha=(1,1,1)\pi/d$, $\mathbf{Q}_\gamma=(1,1,0)\pi/d$ (последний совпадает с вектором Яна-Теллера, т.е. $\mathbf{Q}_\gamma=\mathbf{Q}_{JT}$). Повернув должным образом гамильтониан (3) мы получили для скорости спиновой релаксации в этой области температур следующий результат:

$$\Gamma_{reg}^{CF} = \frac{C}{T\chi(T)} \Gamma_{CF}(\infty) t^{2\beta} f_{reg}(\theta, \psi), \quad (5)$$

где

$$\Gamma_{CF}(\infty) = \frac{[4S(S+1)-3]D_0^2}{200 \cdot \hbar \cdot \sqrt{6S(S+1)\langle J^2 \rangle}}, \quad (6)$$

$$\begin{aligned}
f_{reg}(\theta, \psi) = & (1+3\zeta)^2 + (1-\zeta)^2 - 4\alpha^2 \left[(1+3\zeta)^2 - 3(1-\zeta)^2 \right] \\
& + 0.5 \sin^2(\theta) \left\{ \left[(1+3\zeta)^2 - 3(1-\zeta)^2 \right] (3\alpha^2 - 1) \right. \\
& \left. - \left(\left[(1+3\zeta)^2 - 3(1-\zeta)^2 \right] \alpha^2 + 4(1+3\zeta)(1-\zeta)\gamma \right) \cos 2\psi \right\}. \quad (7)
\end{aligned}$$

Здесь θ и ψ - полярный и азимутальный углы между внешним магнитным полем и осями z и x соответственно.

В этой главе так же предлагается микроскопический вывод гамильтониана взаимодействия Мории-Дзялошинского в том случае, когда основу анизотропии составляет искажение кристаллического поля за счет малых поворотов октаэдров вокруг главных осей и влияния орбитальных триплетных состояний на орбитальный дублет через механизм спин-орбитальной связи. На его основе определен вклад в ширину линии ЭПР от взаимодействия Мории-Дзялошинского в зависимости от температуры и угла приложения внешнего магнитного поля в области орбитального упорядочения:

$$\begin{aligned}
M_2^{DM} = & -g\mu_B \frac{1}{3} [S(S+1)(2S+1)] \times \left(\frac{4\lambda J}{\Delta} \right)^2 \times \\
& \times 18 \left\{ 5\alpha^2 + 8\gamma^2 - \sin^2 \theta \left[4\gamma^2 - 5\alpha^2 - 2\alpha^2 \cos 2\psi \right] \right\}, \quad (8)
\end{aligned}$$

здесь λ - постоянная спин-орбитального взаимодействия, J - обменный интеграл (здесь положили $J_{ac}=J_b=J$), Δ - расстояние между e_g и t_{2g} уровнями. Сравнение (5) и (6) показывает, что взаимодействие Мории-Дзялошинского дает сравнительно

небольшой вклад в зависимость ширины линии ЭПР от ориентации внешнего магнитного поля.

Используя уравнение движения для оператора в квантовой механике, автор работы определил поправки к компонентам \mathbf{g} – тензора, обусловленные тонкой структурой в главных осях в случае ориентации внешнего магнитного поля определяемой углами Эйлера (φ, θ, ψ) :

$$\begin{aligned} g_{xx} &= g_{\perp} + \frac{D\chi(T)}{4\mu_B^2} \left[(1+3\zeta) + 6\gamma(1-\zeta) - 3\alpha^2(1+3\zeta) \right] \\ g_{yy} &= g_{\perp} + \frac{D\chi(T)}{4\mu_B^2} \left[(1+3\zeta) - 6\gamma(1-\zeta) \right] \\ g_{zz} &= g_{\parallel} + \frac{D\chi(T)}{4\mu_B^2} \left[-(1+3\zeta) + 3\alpha^2(1+3\zeta) \right] \end{aligned} \quad , \quad (9)$$

здесь g_{\perp} , g_{\parallel} – эффективные g – факторы, усредненные по двум подрешеткам вследствие обменного взаимодействия. Из полученного выражения видно, что понижение симметрии эффективного \mathbf{g} – тензора ($g_{xx} \neq g_{yy}$) обусловлено неразрешенной тонкой структурой спектра ЭПР, причем эти поправки сильно зависят от температуры.

В третьей главе проведено исследование аномального поведения сигнала ЭПР в приближении к магнитному фазовому переходу. В приближении случайных фаз показано, что вклад кристаллического поля в ширину линии ЭПР при $T \rightarrow T_N$ становится существенным вследствие расходимости длины корреляции ξ :

$$\Gamma_{div}^{CF} = \kappa \frac{D^2}{J} \frac{C}{T \chi(T)} \left(\frac{\xi}{d} \right)^{\frac{3}{2}} f_{div}(\theta, \psi) \quad (10)$$

где

$$\begin{aligned} f_{div} = \frac{1}{8} \bigg\{ & 4(1+3\zeta)^2 + 16(1-\zeta)\gamma^2 - 10(1+3\zeta)^2 \alpha^2 \\ & + \sin^2 \theta \left[-2(1+3\zeta)^2 - 8(1-\zeta)^2 \gamma^2 + 10(1+3\zeta)^2 \alpha^2 \right. \\ & \left. - (1-\zeta)(1+3\zeta)\gamma \cos 2\psi - 6(1+3\zeta)^2 \alpha^2 \cos 2\psi \right] \bigg\}. \end{aligned} \quad (11)$$

Здесь κ – безразмерный коэффициент. Так же показано отсутствие критического вклада в ширину линии ЭПР от взаимодействия Мории-Дзялошинского.

Четвертая глава посвящена анализу полученных результатов и сравнению их с экспериментальными данными предоставленными экспериментальной группой из Аугсбурга из Института Физики Университета Аугсбурга. Результаты предыдущих глав сведены в единое выражение:

$$\begin{aligned} \Gamma = \frac{1}{T \chi(T)} \bigg\{ & \Gamma_{DM}(\infty) + \Gamma_{CFR}(\infty) t^{2\beta} f_{reg}(\theta, \psi) \\ & + \Gamma_{CFD}(\infty) t^{2\beta} \tau^\alpha f_{div}(\theta, \psi) \bigg\} \end{aligned} \quad (12)$$

с $\tau = (T - T_N)/T_N$. Мы предположили, для τ произвольный критический индекс α вместо модельного значения 0.75. Здесь $\Gamma_{DM}(\infty)$ - вклад в ширину линии от взаимодействия Мории-Дзялошинского. Как уже отмечалось, анизотропия ЭПР сигнала, обусловленная взаимодействием Мории-Дзялошинского, значительно слабее

анизотропии вызванной кристаллическим полем, поэтому мы пренебрегли его угловой зависимостью в процессе фитинга. Регулярная и расходящаяся части вкладов кристаллического поля представлены параметрами $\Gamma_{\text{CFR}}(\infty)$ и $\Gamma_{\text{CFD}}(\infty)$, соответственно.

На рисунке 1 представлена ширина линии в ян-теллеровской искаженной O' фазе для $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ для трех главных ориентаций внешнего магнитного поля вдоль кристаллических осей a, b, c . Экспериментальные результаты обозначены символами, сплошные линии – кривые фитинга по формуле (12).

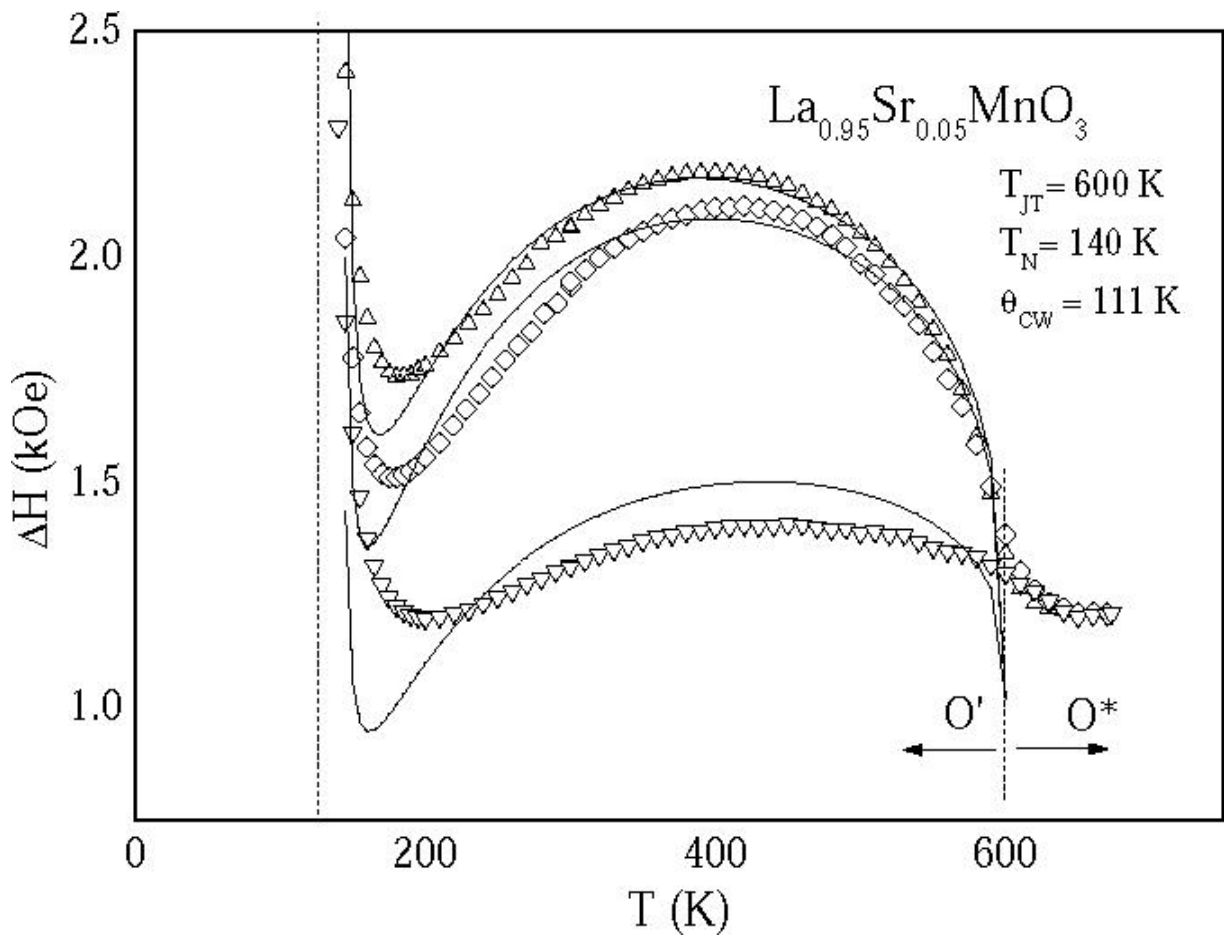


Рисунок 1. Температурная зависимость ширины линии ЭПР в $\text{La}_{0.95}\text{Sr}_{0.05}\text{MnO}_3$. Сплошные линии представляют фитинг по трем кривым одновременно с использованием выражения (12).

На рисунке 2 изображена температурная зависимость ширины линии вместе с различными теоретическими вкладами, рассчитанными в главах 2 и 3 и отраженных в (12) для случая, когда постоянное магнитное поле приложено вдоль кристаллографической оси a .

Рисунок 3 показывает угловую зависимость ширины линии в янтеллеровской искаженной O' фазе для $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ при 300К и 200К. Следует отметить, что угловая зависимость показывает все смещенным на 100 Ое потому, что данные были получены на другом кристалле со слегка отличной стехиометрией. Мы использовали наблюдаемые температуры переходов $T_N=140\text{К}$, $T_{JT}=600\text{К}$ и $\Theta_{CW}=111\text{К}$ как фиксированные параметры, согласно измерениям восприимчивости. Подгонка данных дала следующие величины параметров: $\Gamma_{\text{DM}}(\infty) = 1\text{кОе}$, $\Gamma_{\text{CFR}}(\infty) = 0.57\text{кОе}$, $\zeta = 0.37$, $\Gamma_{\text{CFD}}(\infty) = 10\text{кОе}$, $\alpha = 1.8$, $\beta = 0.16$, $\gamma = 0.23$. Видно, что предсказанная разность угловой зависимости между ab и bc плоскостями достаточно возрастает при 200К за счет расходящегося вклада из-за приближения к магнитному фазовому переходу в согласии с экспериментальными данными.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертации:

1. Разработана теоретическая модель описания орбитального упорядочения при фазовом переходе вследствие кооперативного эффекта Яна-Теллера для слабодопированных манганитов с учетом как искажений октаэдров MnO_6 так и их локальных вращений.

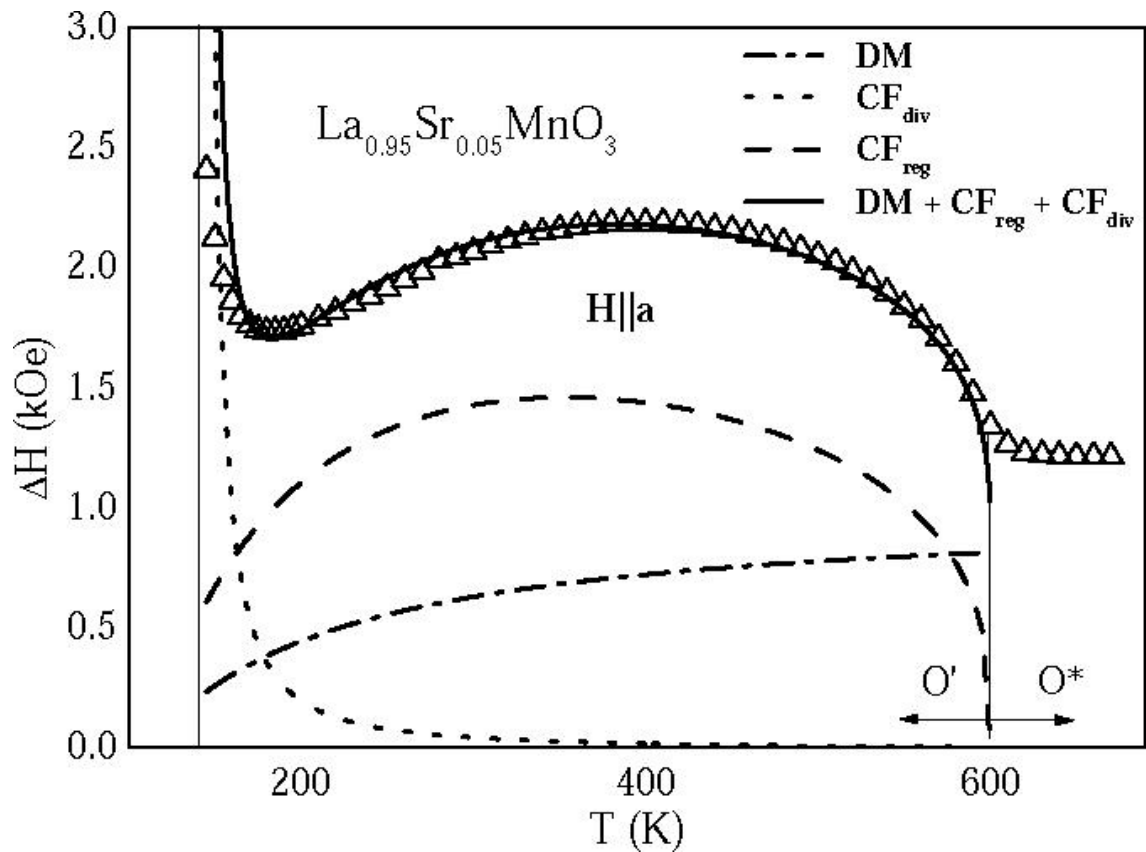


Рисунок 2. Температурная зависимость ширины линии ЭПР в $\text{La}_{0.95}\text{Sr}_{0.05}\text{MnO}_3$. Различные вклады в ширину линии: взаимодействие Мории-Дзялошинского (DM) – штрих-пунктирная линия; регулярная часть кристаллического поля (CF_{reg}) – пунктирная линия; расходящаяся часть (CF_{div}) – линия точек. Сумма вкладов (DM + CF_{reg} + CF_{div}) – сплошная линия.

2. На основе предложенной модели вычислена зависимость параметров сигнала ЭПР от температуры и ориентации внешнего магнитного поля относительно кристаллографических осей. Показано, что в условиях сильных обменных взаимодействий между ионами Mn^{3+} , решающую роль в необычной немонотонной температурной зависимости

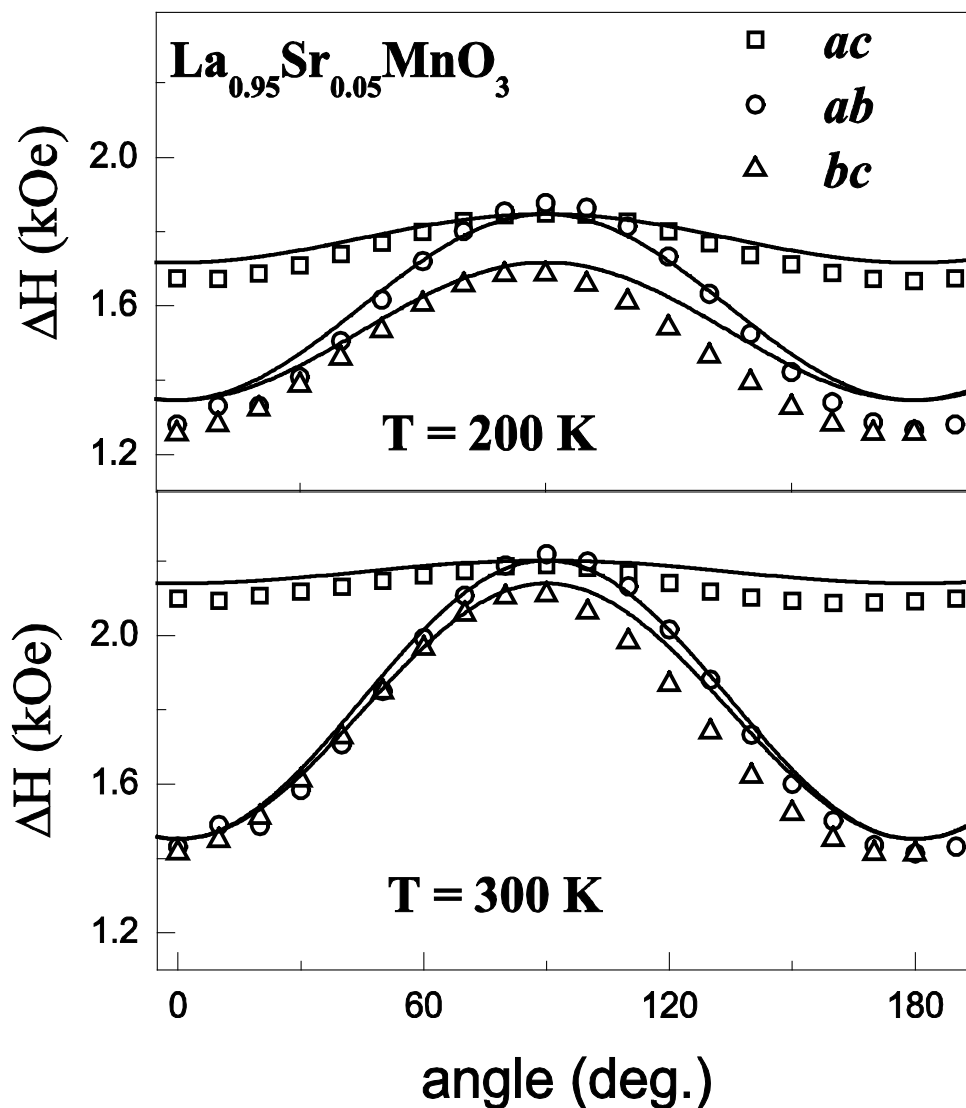


Рисунок 3. Угловая зависимость ЭПР ширины линии в $\text{La}_{0.95}\text{Sr}_{0.05}\text{MnO}_3$. Сплошные линии представляют фитинг с использованием выражения (12) при 300K и 200K. Следует отметить, что угловая зависимость показывает все смещенным на 100 Oe потому, что данные были получены на другом кристалле со слегка отличной стехиометрией.

ширины линии ЭПР играет неразрешенная тонкая структура спиновых уровней энергии, обусловленная ян-теллеровскими искажениями кристаллической решетки. Определены поправки

к эффективному \mathbf{g} – тензору через параметры спинового гамильтониана указанной тонкой структуры.

3. В рамках приближения случайных фаз найдено критическое уширение линии ЭПР при приближении к магнитному фазовому переходу в АФМ состояние, которое обусловлено неразрешенной тонкой структурой спектра ЭПР.
4. Рассмотрен вклад в ширину линии ЭПР обусловленный анизотропным антисимметричным обменным взаимодействием Мории-Дзялошинского. Показано, что это взаимодействие не дает вклада в критическое уширение линии ЭПР при магнитном фазовом переходе в АФМ состояние и дает сравнительно слабую зависимость от ориентации внешнего магнитного поля.
5. Показана возможность отразить особенности поведения системы $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ в области температур $T_N < T < T_{JT}$ одним самосогласованным выражением. Проведен фитинг выведенной единой формулы с экспериментальными данными для системы $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$. По результатам фитинга определены параметры орбитального и магнитного порядка. Указан тип орбитального упорядочения посредством угла смешивания орбиталей. Определенный из общей формулы характер поведения ширины линии ЭПР согласуется с экспериментальными данными. Полученное значение критического индекса орбитального упорядочения подтверждается данными резонансного рассеяния рентгеновских лучей.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

- I. Kochelaev B.I. Phase transitions and spin relaxation in $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ / B.I. Kochelaev, E.Shilova, J. Deisenhofer, H.-A. Krug von Nidda, A. Loidl, A.A. Mukhin, A.M. Balbashov // Modern. Physics. Letters. B. – 2003.- V.17, № 10,11,12. - P.459-467.
- II. Deisenhofer J. Orbital order parameter in $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ probed by electron spin resonance / J. Deisenhofer, B.I. Kochelaev, E.Shilova, H.-A. Krug von Nidda, A. Loidl, A.A. Mukhin, A.M. Balbashov // Physical Review B. – 2003.- V.68, № 21. - P.214427-1-5.
- III. Кочелаев Б.И. Орбитальное упорядочение, угловая и температурная зависимость спиновой релаксации в манганитах / Б.И. Кочелаев, Е. Шилова // Международная зимняя школа физиков теоретиков “Коуровка-2002”, Кунгур - 2002. с.211.
- IV. Кочелаев Б.И. Влияние фазовых переходов на спиновую релаксацию в манганитах / Б.И. Кочелаев, Е. Шилова // Международная зимняя школа физиков теоретиков “Коуровка-2004”, Екатеринбург-Челябинск. - 2004. с.58-А.
- V. Kochelaev B.I. Orbital ordering, angular and temperature dependence of the spin relaxation in manganites // B.I. Kochelaev, E.Shilova // Международная конференция “Современные проблемы сверхпроводимости”, Yalta. - 2002. p.27 .
- VI. Кочелаев Б.И. Влияние орбитального упорядочения на спиновую релаксацию в манганитах / Б.И. Кочелаев, Е.

Шилова // 7 –ая российская молодежная научная школа “Новые аспекты применения магнитного резонанса”, Казань - 2003. с.189.

VII. Кочелаев Б.И. Влияние фазовых переходов на спиновую релаксацию в манганитах / Б.И. Кочелаев, Е. Шилова // 9-ая научная конференция молодых ученых, аспирантов и студентов научно-образовательного центра Казанского государственного университета “Материалы и технологии XXI века”, Казань - 2004. с.43.

VIII. Kochelaev B.I. Orbital ordering in manganites as revealed by temperature and angular dependence of the spin relaxation // B.I. Kochelaev, E.Shilova // Abstracts of International conference “Nanoscale properties of condensed matter probed by resonance phenomena”, Kazan. - 2004. p.130.

Литература

1. Jonker G.H. Ferromagnetic compounds of manganese with perovskite structure / G.H. Jonker , J.V. Santen //Physica. - 1950. - V.16. - P.337-340.
2. Urushibara A. Insulator-metal transition and giant magnetoresistance in $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ / A. Urushibara, Y. Morimoto, T. Arima, A. Asamitsu, G. Kido, Y. Tokura // Physical Review B. – 1995.- V.51, № 20. - P.14103-14106.
3. Shiffer P. Low temperature magnetoresistance and the magnetic phase diagram of $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$ / P. Shiffer, A.P. Ramirez, W. Bao,

S.-W.Cheong // Physical Review Letters – 1995. - V.75, № 18. - P.3336-3339.

4. Троянчук И.О. Фазовые превращения и магнитотранспортные явления в системе $\text{La}_{2/3}\text{Ba}_{1/3}(\text{Mn}_{1-x}\text{Co}_x)\text{O}_3$ / И.О. Троянчук, Л.С. Лобановский, Д.Д. Халявин, В.П. Яруничев, Н.В. Пушкарев, Г. Шимчак // Журнал экспериментальной и теоретической физики. -1999. – Т.116, №8. - С.604-610.
5. Носов А.П. Магниторезистивные свойства объемных поликристаллических $\text{La}_{0.75}\text{Sr}_{0.25}\text{MnO}_3$ магнитов / А.П. Носов, В.Г. Васильев, Е.В. Владимирова, В.В. Устинов // Физика металлов и металловедение. – 2001. - Т.92, № 5. - С.59-65.
6. Anderson P.W. Antiferromagnetism. Theory of superexchange interaction / P.W. Anderson // Physical Review. - 1950. - V79, №2 - P.350-356.
7. Anderson P.W. Considerations on double exchange /P.W. Anderson, H. Hasegawa // Physical Review. -1955. - V.100, №2. - P.675-681.
8. Anderson P.W. New approach to the theory of superexchange interactions / P.W. Anderson // Physical Review. - 1959. - V.115, №1. - P.2-13.
9. Ионов С.П. Некоторые теоретические аспекты зарядовой и структурной неустойчивости кристаллической решетки и возможности её изучения в ЯКР спектроскопии / Известия академии наук СССР, Серия физическая. - 1981. - Т.45, №3. - С.589-633.
10. Rodrigues - Carvajal J. Neutron - diffraction study of the Jahn-Teller transition in stoichiometric LaMnO_3 / J. Rodrigues - Carvajal,

- M. Hennion, F. Moussa, A. H. Moudden, L. Pinsard, A. Revcolevschi
// Physical Review B. - 1998. - V.57, №6. - P. R3189-R3192.
11. Goodenough J.B. Relationship between crystal symmetry and magnetic properties of ionic compounds containing Mn^{3+} / J.B. Goodenough, A. Wold, R.J. Arnot, N. Menyuk // Physical Review. – 1961. – V.124. – P.373-384.
12. Zener C. Interaction between the *d*-shells in the transition metals. II. Ferromagnetic compounds of manganese with perovskite structure / C. Zener // Physical Review. – 1951. – V.82. – P.403-405.
13. Вонсовский С.В. Магнетизм / С.В. Вонсовский. - М.: Наука. 1971. - 693 с.
14. de Gennes P.-G. Effects of double exchange in magnetic crystals / P.-G. de Gennes // Physical Review. - 1960. - v.118. - P.141-154.